

上海交通大学硕士学位论文

## 债权人会议系统设计与开发

硕士研究生：王 浩 宇

学 号：5140719024

导 师：吴 刚

申 请 学 位：工学硕士

学 科：软件工程

所 在 单 位：电子信息与电气工程学院

答 辩 日 期：2022 年 5 月 29 日

授予学位单位：上海交通大学



Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University  
for the Degree of Master

# **CREDITOR MEETING SYSTEM DESIGN AND DEVELOPMENT**

<b>Candidate:</b>	Mo Mo
<b>Student ID:</b>	5140719024
<b>Supervisor:</b>	Prof. Mou Mou
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Master of Engineering
<b>Speciality:</b>	A Very Important Major
<b>Affiliation:</b>	Depart of XXX
<b>Date of Defence:</b>	May 29, 2022
<b>Degree-Confering-Institution:</b>	Shanghai Jiao Tong University



# 上海交通大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期：          年      月      日

# 上海交通大学

## 学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本学位论文属于 ☐ 公开论文

☐ 内部论文， ☐ 1 年/☐ 2 年/☐ 3 年    解密后适用本授权书。

☐ 秘密论文， \_\_\_\_ 年（不超过 10 年）解密后适用本授权书。

☐ 机密论文， \_\_\_\_ 年（不超过 20 年）解密后适用本授权书。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期：          年      月      日

日期：          年      月      日



# 债权人会议系统设计与开发

## 摘 要

近年来，在疫情、新一代数字技术的快速发展以及国家对于数字化基础设施建设大力支持的影响下，各行各业都加快进行数字化变革。在破产领域中，债权人会议是破产程序中必不可少的一环，而由于现场会议召开的成本过高且十分受限于疫情，而传统会议系统又无法满足债权人会议需求，因此需要对债权人会议业务的全面数字化。

本文针对债权人会议人数多、请求在短时间内密集、实时性要求高的特点提出针对高并发场景、实时反映表决情况的债权人会议系统的设计与开发方案，结合相关法律知识，贴合债权人会议的现实业务，通过使用 **Kafka** 进行流量削峰解和使用 **Redis** 做高速缓存解决高并发情况下带来的问题，通过对实时后端的针对设计让债权人会议系统的实时性更强，使债权人会议的线上召开更为流畅。

目前对债权人会议系统的研究十分匮乏，本文在法律业务数字化、债权人会议系统的设计开发、高并发架构针对设计、实时业务开发等方面提供了一定的参考价值。**Mongo** 写入性能为本系统性能瓶颈，之后优化方向可以从此方面着手。

**关键词：**债权人会议，视频表决系统，高并发，实时系统

## **CREDITOR MEETING SYSTEM DESIGN AND DEVELOPMENT**

### **ABSTRACT**

In recent years, under the influence of the epidemic, the rapid development of a new generation of digital technology and the country's strong support for the construction of digital infrastructure, all industries are accelerating digital transformation. In the field of bankruptcy, creditors' meeting is an essential part of the bankruptcy process. However, due to the high cost of on-site meeting, which is very limited by the epidemic, and the traditional meeting system cannot meet the needs of creditors' meeting, it is necessary to fully digitize the creditors' meeting business.

In view of the characteristics of large number of creditors' meetings, intensive requests in a short time and high real-time requirements, this paper proposes the design and development scheme of creditors' meeting system for high concurrent scenarios and real-time reflection of voting situation, and combines relevant legal knowledge to fit the realistic business of creditors' meetings. Through the use of Kafka flow peak cutting solution and the use of Redis cache to solve the problem of high concurrency, through the design of the real-time back-end so that the real-time creditor meeting system is stronger, so that the online creditor meeting is more fluent.

At present, the research of creditor meeting system is very scarce. This paper provides some reference value in legal business digitization, creditor meeting system design and development, high concurrency architecture design, real-time business development and so on. Mongo write performance is the performance bottleneck of the system, and then the optimization direction can start from this aspect.



**KEY WORDS:** Creditor's rights and meeting, Video voting system, High concurrency, Real-time

## 目 录

第一章 绪论 .....	1
1.1 研究背景与意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	3
1.3 主要研究内容和工作内容 .....	4
1.4 本文结构 .....	4
第二章 背景介绍 .....	6
2.1 研究背景与意义 .....	6
2.1.1 研究的背景 .....	6
2.1.2 研究的意义 .....	7
第三章 全文总结 .....	8
参考文献 .....	9
附录 A <b>Maxwell Equations</b> .....	10
附录 B 绘制流程图 .....	11
致 谢 .....	12
学术论文和科研成果目录 .....	13
个人简历 .....	14

## 插图索引

## 表格索引

## 算法索引

## 符号对照表

$\epsilon$  介电常数

$\mu$  磁导率

## 第一章 绪论

本章从对律师行业破产领域的债权人会议业务数字化的研究背景意义出发,系统阐述国内外研究最新研究成果,以及概述本文主要研究内容、工作内容和本文的主要结构。

### 1.1 研究背景与意义

本文提到的数字化主要是利用数字技术,对具体业务、场景的数字化改造<sup>[1]</sup>。近年来,我国不断加快数字基础设施建设,推进工业互联网、人工智能、物联网、车联网、大数据、云计算、区块链等技术集成创新和融合应用,让数字化应用更加广泛深入到社会经济运行的各个层面。而律师行业作为一个传统行业,目前大部分还处于传统的手工业时代,信息靠纸质材料收集整理,存储靠库房堆积,十分影响效率。如今正处疫情期间,线下办公的方式受到了极大的限制,而业务不会因为限制的存在而减少,大量的业务堆积带来了极大的不便,顾永忠<sup>[2]</sup>提出将信息技术创新运用于律师管理和服务,意义深远、大有可为,律师行业的数字化变革迫在眉睫。

在破产领域中,债权人会议及相关表决的意义十分重大。债权人会议是由所有依法申报债权的债权人组成,以保障债权人共同利益为目的,为实现债权人的破产程序参与权,讨论决定有关破产事宜,表达债权人意志,协调债权人行为的破产议事机构。董红<sup>[3]</sup>说明了债权人会议具有的重要作用,即债权人会议的存在有利于法院中立公正的定位,有利于保护债权人利益,增强清算组责任,是完善破产监督机制的需要,有利于促进破产程序有序化。所有债权人均作为债权人会议成员,债权人会议成员享有表决权(特殊情况除外),债权人会议的表决结果决定一个破产项目的最终走向,因此在破产程序中,召开债权人会议是不必不可少的一环。

在破产案件中,债权人较为分散,很大可能来自于全国各地,如果只召开现场会议,显然有些单一和固化,需要全国各地的债权人汇聚到一地,召开成本过高不利于高效快捷的处理问题。并且在目前疫情的影响下,将全国各地的债权人召集到一起召开债权人会议显然不切实际,因此实现破产业务的数字化转型是具有重要意义的。

目前暂时没有专门针对债权人会议系统的研究。常规的视频会议系统有飞书会议系统,钉钉会议系统和腾讯会议系统。首先从数量级上讲,飞书会议系统最

大支持 1000 人同时参会，钉钉会议系统最大支持 302 人同时参会，而腾讯会议企业版最高支持 2000 人同时参会，对于债权人会议人数动辄千人，偶尔上万的级别来说，常规会议系统在数量级上不能满足需求。另外，债权人会议的重中之重是进行表决，表决的类型和计算方法十分繁杂，和破产相关法律紧密挂钩，传统的会议系统在专业性上也不能满足需求，因此对于常规会议系统的研究并不适用于本文所针对的债权人会议系统。

债权人会议系统是专门针对债权人会议的系统，首先由于债权人会议人数通常较多，且会议表决通常是集中在一段时间内，债权人会议系统应该扩大参会人数量级别，且必须考虑对高并发情况的支撑。其次，债权人会议系统除了应该满足常见会议系统的直播、实时聊天功能以外，还需要对债权人会议的表决进行支持。债权人会议系统应该满足常见的多种表决方式，并可以自设表决方式，根据表决方式的不同，计算表决结果的方式也不同。在表决过程中，表决进程的实时反馈对于管理人端十分重要，因此表决功能也应该是实时功能。

破产领域的债权人会议全面数字化的研究意义主要有以下三点：

1. 债权人会议全面数字化可以简化破产项目的流程。由于受新冠肺炎疫情影响，通过网络形式召开债权人会议成为管理人的主要选择。网络债权人会议所代表的破产案件线上化操作的优势是非常明显的——这种优势不仅体现在疫情期间，线上化操作无论是数据存储还是就地使用，都更加简便快捷和规范高效，代表破产业务未来的工作趋势。网络债权人会议是在网络时代下，利用网络技术对债权人会议召开方式的革新，有利于提高工作效率，有利于更好保障债权人权利。

2. 债权人会议全面数字化便于存储和利用破产项目产生的数据。数字化以数据为主要生产要素，将企业中所有的业务、生产、营销、客户等有价值的人、事、物全部转变为数字存储的数据，形成可存储、可计算、可分析的数据、信息、知识，并和企业获取的外部数据一起，通过对这些数据的实时分析、计算、应用可以指导企业生产、运营等各项业务。而每一次的债权会议都能产生大量的数据，对这些数据进行有效的利用，可以产生极大的经济价值。

3. 债权人会议全面数字化过程中需要对高并发进行针对性的设计。近年来随着计算机技术和网络技术的迅速崛起，互联网日渐深刻的在改变着人们的生产生活方式。互联网的发展带来了需求的激增、技术上的压力，系统架构也因此不断的演进、升级、迭代。从单一应用，到垂直拆分，到分布式服务，到 SOA，以及现在火热的微服务架构。虽然解决了大部分的问题，但是即时访问量比较巨大时，还是存在一些问题，尤其是高并发还是需要进行大量的设计和研究。对债权会议系统来说，一场债权会议的人数通常是千人到万人级别，有些甚至达到十万人级



别,如果同时进行多场会议,且会议表决通常是集中在一段时间内的,这就带来了高并发问题,而债权会议的数据无比重要,如果丢失重要数据或者服务突然停摆,则意味着客户的永久失去及巨额的经济损失,因此债权会议数字化过程中,高并发针对性设计的重要性不言而喻。

## 1.2 国内外研究现状

近年来国内外学者和工程师不断探索传统行业数字化转型的实施方法,芦珊<sup>[4]</sup>提出剖析企业数字化转型的需求、目标、重点领域,深挖企业数字化转型的共性问题,通过分析企业数字化转型的顶层设计、业务、技术、运营数字化转型具体需求,提出适应企业转型建设的基础框架体系,用以指导企业数字化转型规划实施。

随着数字化建设的快速发展,越来越多现实生活中的业务都转到了线上进行,传统的 Web 架构难以满足日趋复杂的软件要求和服务质量的要求。随着大量服务转入线上,许多业务的办理变得简洁而快速,相应的由于越来越多的客户转倒线上,各种服务的并发量都在逐渐提升,高并发已经成为了一种常见的问题。而传统的大型分布式系统采用的高并发解决方案不适用部署在单服务器上的中小型 Web 应用,对于特定服务,需要针对性的设计高并发架构和其他解决方案,例如黄素萍<sup>[5]</sup>等人提出针对单服务器的网络应用提出了一种适用的流量控制方案,即结合缓存、消息队列、不可重入锁的网络流量高并发优化处理算法方案。该方案使 Web 应用系统较传统数据库操作数据方法的处理能力和效率有明显提升,支持并发较高时的同时访问与同步数据处理,提升系统的并发性和吞吐量,同时保证系统的可用性。陈明<sup>[6]</sup>等人针对传统 Web 容器管理会话的方案已经难以满足系统高可用的诉求的问题,提出了一种 SESSION 共享的方法解决该问题。

上文提到目前暂时没有专门针对债权人会议系统的研究。虽然没有相关的文献,但目前国内已经涌现了一批服务于债权人会议的债权会议平台,其中较成熟的债权会议平台有:钉钉平台网络债权人会议、京东债权人会议系统、上海市第三中级人民法院会议系统、华宇九品“e 破通”系统等,但各个会议系统仍各自存在一些问题。钉钉平台网络债权人会议是通过加入钉钉群直播的方式进行,钉钉群的人数上限为 500 人,如果超过需要使用多群联播的方式,最多可以转发至 45 个群,即上限为 22500 人,并且群组过多会导致管理十分不便。京东债权人会议系统需要通过京东自研的 ME(行业版)软件参加会议,并没有专门针对表决的会议设置。上海市第三中级人民法院会议系统较为完备,但是三中院的会议系统中,表决结果的计算不准确,最终表决的通过与否需要管理人下载表决数据自行

计算。而华宇九品“e破通”系统也存在着表决数据表格复杂，管理人填写十分困难的问题。总的来说，目前仍没有一个特别完善的针对债权人会议的债权人会议系统，因此对此课题进行研究具有一定的参考价值。

### 1.3 主要研究内容和工作内容

上文中提到在近年来，在疫情影响、新一代数字技术的快速发展以及国家对于数字化基础设施建设大力支持的影响下，债权人会议的全面数字化具有极其重要的意义，并且目前并没有较为完善的研究。

本文研究设计的系统以冲云系统为载体，针对研究背景中提出的三点研究意义，本文的主要工作是第三点，就是研究支持大规模高并发、实时反映表决情况的债权人会议系统的设计与实现，针对研究意义中的一、二点，在上一版冲云系统的开发中已经进行了相关设计，本文仅仅进行了少量优化，就不再赘述。此前，上一版冲云系统已经进行了和债权人会议系统相关的开发。在另一篇论文中，王志远<sup>[7]</sup>讲述了基于微服务架构的破产业务的运营管理系统的设计与实现，其中包含了对债权人会议的研究。但是在他的实现中，债权人会议仅仅是作为破产业务运营管理系统的一个模块，并且存在业务数据和运营管理系统数据紧耦合、对于高并发的支持不到位、时效性不佳等问题，无法满足真正场景下的债权人会议业务。因此本课题将在对比原系统问题的前提下研究如何设计系统满足破产重整法律案件债权会议的需求以及具体如何实现。主要研究的内容有：

1. 高并发场景下的债权会议系统架构设计
2. 高并发场景下的债权会议系统的数据存储设计
3. 债权会议系统前端设计和优化问题

主要工作内容是债权会议系统的设计以及债权会议系统的前后端开发及性能测试。

### 1.4 本文结构

本篇论文分为绪论、系统需求分析及架构设计、系统后端设计与实现、系统前端设计与优化、实验设计、总结与展望六部分：

1. 绪论。本节高并发债权人会议系统的设计与实现的背景出发，阐述本课题研究的意义。同时，本节将对数字化转型，高并发系统的研究现状以及债权人会议系统的研究现状这三方面进行概述，探索此领域的未来发展方向。本节还介绍了本课题的主要研究内容和工作内容，并简单介绍了本文的主要结构。

2. 系统需求分析及架构设计。本节将从债权人会议的业务现状出发，分析用户需求，在需求分析的基础上，根据系统的需求进行针对性的架构设计。最终本节将确定系统所需要的功能性需求和非功能性需求和系统架构设计并且将简单介绍非实时后端的设计和数据库设计。

3. 实时后端设计与实现。本节将在需求分析的基础上，根据需求进行实时后端的设计以及介绍具体实时后端部分的实现。

4. 前端设计与优化。本节将在需求分析的基础上，根据需求完成前端的设计并针对发现的问题进行相关优化。

5. 实验设计。本节将对系统进行的功能性测试，性能测试工作做相关描述。

6. 总结与展望。本节将总结系统设计与实现的工程，并提出系统优化方案和建议。

## 第二章 背景介绍

数字化是信息技术发展的高级阶段，是数字经济的主要驱动力，随着新一代数字技术的快速发展，各行各业利用数字技术创造了越来越多的价值，这又推动了各行业加快进行数字化变革。本章从对律师行业破产领域的债权会议全面数字化的研究背景意义出发，系统阐述国内外研究最新研究成果。

### 2.1 研究背景与意义

#### 2.1.1 研究的背景

本文提到的数字化主要是利用数字技术，对具体业务、场景的数字化改造。数字技术革命推动了人类的数字化变革。人类社会的经济形态随着技术的进步不断演变，农耕技术开启了农业经济时代，工业革命实现了农业经济向工业经济的演变，如今数字技术革命，推动了人类生产生活的数字化变革，孕育出一种新的经济形态——数字经济，数字化成为数字经济的核心驱动力。数字技术的不断完善让数字化的价值得到充分发挥。近年来，物联网、云计算、人工智能等各类数字技术不断更新，从实验向实践，逐渐工业化，形成了完整的数字化价值链，在各个领域实现应用，推动了各个行业的数字化，为各行业不断创造新的价值。数字基础设施快速发展推动数字化的应用。近年来，我国不断加快数字基础设施建设，推进工业互联网、人工智能、物联网、车联网、大数据、云计算、区块链等技术集成创新和融合应用，让数字化应用更加广泛深入到社会经济运行的各个层面，推动数字经济的发展。

律师行业作为一个传统行业，目前大部分还处于传统的手工业时代，信息靠纸质材料收集整理，存储靠库房堆积，十分影响效率。如今正处疫情期间，线下办公的方式受到了极大的限制，而业务不会因为限制的存在而减少，大量的业务堆积带来了极大的不便，律师行业的数字化变革迫在眉睫。

而在破产领域中，会议和表决的意义十分重大，决定着一个破产项目的走向，为了实现破产业务的数字化转型，专门设计针对破产项目表决的会议系统是必不可少的。企业破产项目债权人很容易高达千人级别甚至万人级别，如果同时进行多场会议，且在同一时间段进行表决的情况下，并发量将极大的提升，对服务器造成极大的压力，因此需要设计开发专门针对高并发情况下的会议表决系统。

### 2.1.2 研究的意义

破产领域的债权人会议全面数字化的研究意义主要有以下三点。

一是由于受新冠肺炎疫情影响，通过网络形式召开债权人会议成为管理人的主要选择。网络债权人会议所代表的破产案件线上化操作的优势是非常明显的——这种优势不仅体现在疫情期间，线上化操作无论程序设计还是设备使用，更加简便快捷和规范高效，代表破产业务未来的工作趋势。网络债权人会议是在网络时代下，利用网络技术对债权人会议召开方式的革新，有利于提高工作效率，有利于更好保障债权人权利。但网络债权人会议有别于传统债权人会议，产生了许多新的问题需要解决。债权人会议系统有别于常规的会议系统，和破产法律紧密挂钩，常规的会议系统并不适用，因此需要设计开发针对性的债权人会议系统。

二是数字化以数据为主要生产要素，将企业中所有的业务、生产、营销、客户等有价值的人、事、物全部转变为数字存储的数据，形成可存储、可计算、可分析的数据、信息、知识，并和企业获取的外部数据一起，通过对这些数据的实时分析、计算、应用可以指导企业生产、运营等各项业务。而每一次的债权人会议都能产生大量的数据，这些数据可以产生极大的经济价值，因此需要保证对这些数据的存储的可靠性。

三是近年来随着计算机技术和网络技术的迅速崛起，互联网日渐深刻的在改变着人们的生产生活方式。互联网的发展带来了需求的激增、技术上的压力，系统架构也因此不断的演进、升级、迭代。从单一应用，到垂直拆分，到分布式服务，到 SOA，以及现在火热的微服务架构。虽然解决了大部分的问题，但是即时访问量比较巨大时，还是存在一些问题，尤其是高并发和高可用还是需要进行大量的设计和研究。对债权人会议系统来说，一场债权人会议的人数通常是千人到万人级别，有些甚至达到十万人级别，如果同时进行多场会议，且会议表决通常是集中在一段时间内的，这就带来了高并发问题，而债权人会议的数据无比重要，如果丢失重要数据或者服务突然停摆，则意味着客户的永久失去及大量的经济损失，因此债权人会议数字化过程中，高并发和高可用的针对性设计的重要性不言而喻。

## 第三章 全文总结

本章将对支持大规模高并发、实时反映表决情况的债权人会议系统的设计与实现的工作进行总结，并根据课题论文的研究成果展望该领域未来发展方向。

本次课题研究以法律业务数字化为基点开展了研究，并且设计了针对高并发、实时反映表决情况的债权人会议系统，解决了债权会议业务数字化的问题，使债权会议全面线上化。在具体研究的过程中，所涉及到的开发技术有：面向对象程序设计、网页制作技术、消息队列、高速缓存等，最终设计并实现了高并发债权人会议系统。具体研究内容有：

1. 通过与甲方律师不断商讨的方式了解用户对于债权人会议系统的需求。对于实际需求，采用软件工程需求描述语言确定了系统的功能性需求。明确了软件开发的开发和开发的标准。

2. 针对高并发债权人会议系统的设计工作。为了适应本系统的需求，设计了针对性的架构解决系统性能问题。

3. 系统的开发及测试分析。概述了系统的前后端具体设计和部分实现。展示核心功能功能的运行界面。完成系统设计之后，对系统进行功能性测试和部分性能测试。

本系统是对传统行业产业数字化的一次尝试。通过将信息技术应用于传统法律行业，系统帮助实现破产领域债权会议业务的数字化，极大提高了债权会议业务的进行效率。当然系统本身也存在一些不足之处，比如系统的 **Mongo** 写入性能为本系统的性能瓶颈，若后续系统达到性能瓶颈，需要对 **Mongo** 的写入性能做出优化。

## 参考文献

- [1] 谢卫红, 林培望, 李忠顺, 等. 数字化创新: 内涵特征、价值创造与展望[J]. 外国经济与管理, 2020, 42(9): 19-31.
- [2] 顾永忠. 运用信息技术创新律师管理和服务大有可为[J]. 中国律师, 2021(3): 1.
- [3] 董红. 关于破产债权人会议制度的思考[J]. 特区经济, 2010(6): 228-229.
- [4] 芦珊. 企业数字化转型路径研究[J]. 现代商业, 2022(8): 10-13.
- [5] 黄素萍, 刘敏娜, 朱亚兵, 等. 一种 Web 高并发系统的研究与实现[J]. 智能物联技术, 2021, 4(5): 47-50.
- [6] 陈明, 汤茂安, 胡杨. 高并发大用户量场景下 SESSION 共享的方法及实现[J]. 网络安全和信息化, 2021(5): 92-94.
- [7] 王志远. 基于微服务架构的运营管理系统的设计与实现[D]. 上海: 上海交通大学, 2021: 12-13.

## 附录 A Maxwell Equations

选择二维情况，有如下的偏振矢量：

$$\mathbf{E} = E_z(r, \theta)\hat{\mathbf{z}}, \quad (\text{A-1a})$$

$$\mathbf{H} = H_r(r, \theta)\hat{\mathbf{r}} + H_\theta(r, \theta)\hat{\boldsymbol{\theta}}. \quad (\text{A-1b})$$

对上式求旋度：

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} \hat{\mathbf{r}} - \frac{\partial E_z}{\partial r} \hat{\boldsymbol{\theta}}, \quad (\text{A-2a})$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right] \hat{\mathbf{z}}. \quad (\text{A-2b})$$

因为在柱坐标系下， $\bar{\mu}$  是对角的，所以 Maxwell 方程组中电场  $\mathbf{E}$  的旋度：

$$\nabla \times \mathbf{E} = i\omega \mathbf{B}, \quad (\text{A-3a})$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} \hat{\mathbf{r}} - \frac{\partial E_z}{\partial r} \hat{\boldsymbol{\theta}} = i\omega \mu_r H_r \hat{\mathbf{r}} + i\omega \mu_\theta H_\theta \hat{\boldsymbol{\theta}}. \quad (\text{A-3b})$$

所以  $\mathbf{H}$  的各个分量可以写为：

$$H_r = \frac{1}{i\omega \mu_r} \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta}, \quad (\text{A-4a})$$

$$H_\theta = -\frac{1}{i\omega \mu_\theta} \frac{\partial E_z}{\partial r}. \quad (\text{A-4b})$$

同样地，在柱坐标系下， $\bar{\epsilon}$  是对角的，所以 Maxwell 方程组中磁场  $\mathbf{H}$  的旋度：

$$\nabla \times \mathbf{H} = -i\omega \mathbf{D}, \quad (\text{A-5a})$$

$$\left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right] \hat{\mathbf{z}} = -i\omega \bar{\epsilon} \mathbf{E} = -i\omega \epsilon_z E_z \hat{\mathbf{z}}, \quad (\text{A-5b})$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} = -i\omega \epsilon_z E_z. \quad (\text{A-5c})$$

由此我们可以得到关于  $E_z$  的波函数方程：

$$\frac{1}{\mu_\theta \epsilon_z} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{\mu_r \epsilon_z} \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \theta^2} + \omega^2 E_z = 0. \quad (\text{A-6})$$



## 附录 B 绘制流程图

图 B-1 是一张流程图示意。使用 `tikz` 环境，搭配四种预定义节点 (`start`、`stop`、`process`、`decision` 和 `io`)，可以容易地绘制出流程图。

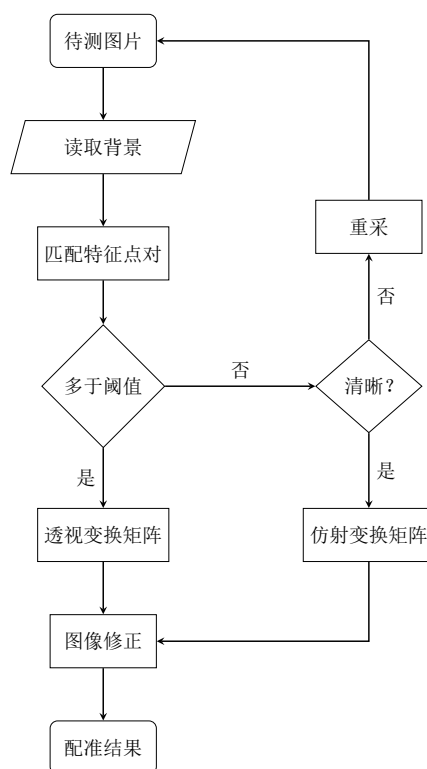


图 B-1 绘制流程图效果

Figure B-1 Flow chart

## 致 谢

感谢上海交通大学软件学院高质量的教学水平, 开设诸多高质量的专业课, 让我有机会在大学四年的时光中系统地学习计算机基础和软件工程等方面地知识, 并能从事相关开发实践。在软件学院诸多优秀的老师和同学的陪伴下, 我大学四年受益良多。

感谢吴刚老师和任锐老师在我编写本论文过程中的指导。老师们在系统开发方面丰富的实践经历和全面的系统意识让我受益良多, 他们严谨认真的科研精神也在时时刻刻地给予我正面的影响。通过和老师们的交流, 我进一步学习了软件工程开发思想和软件系统架构设计的相关知识。感谢老师们能够在我在进行本课题研究遇到问题和疑惑时及时向我伸出援手。

感谢 SAIL 实验室的林许亚伦学长和郑宇宸学长在我开发系统过程给予我的帮助。学长们十分热心负责, 在开发过程中提出了非常多有用的建议, 并且协助我解决了很多难题, 他们的工作态度令人敬佩。

感谢软件工程专业的蒋钊、龙泓杳两位同学这四年以来的帮助和陪伴。两位同学发现问题提出问题的能力, 解决问题严谨认真的态度对我影响颇大, 并且在学业和项目方面对我帮助颇多, 在此对他们由衷的感谢。

## 学术论文和科研成果目录

### 学术论文

- [1] Chen H, Chan C T. Acoustic cloaking in three dimensions using acoustic metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91:183518.
- [2] Chen H, Wu B I, Zhang B, et al. Electromagnetic Wave Interactions with a Metamaterial Cloak[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(6):63903.

### 专利

- [3] 第一发明人, “永动机”, 专利申请号 202510149890.0

## 个人简历

### 基本情况

某某，yyyy 年 mm 月生于 xxxx。

### 教育背景

- yyyy 年 mm 月至今，上海交通大学，博士研究生，xx 专业
- yyyy 年 mm 月至 yyyy 年 mm 月，上海交通大学，硕士研究生，xx 专业
- yyyy 年 mm 月至 yyyy 年 mm 月，上海交通大学，本科，xx 专业

### 研究兴趣

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 排版

### 联系方式

- 地址：上海市闵行区东川路 800 号，200240
- E-mail: xxx@sjtu.edu.cn